

سنگ‌زایی و زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان) با تأکید بر نقش آرایش پوسته‌ای

لیلا ابراهیمی و سیدمحسن طباطبایی منش *

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

منطقه مورد بررسی در خاور روستای نابر و در جنوب‌باختری کاشان جای دارند و بخشی از پهنه ماگمایی ارومیه - دختر به‌شمار می‌آید. سنگ‌های آتشفشانی خاور منطقه نابر با سن ائوسن شامل پیروکسن آندزیت، آندزیت، داسیت و ریولیت هستند. بافت‌های پورفیری، گلوپورفیری، میکروولیتی و غربالی، بافت‌های غالب در این سنگ‌ها هستند. کانی‌های پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن و آمفیبول از کانی‌های اصلی پیروکسن آندزیت‌ها و آندزیت‌ها هستند؛ اما در داسیت‌ها و ریولیت‌ها پلاژیوکلاز، آمفیبول، کوارتز، بیوتیت و پتاسیم‌فلدسپار کانی‌های اصلی هستند. پلاژیوکلاز و کوارتز با خوردگی خلیجی و لبه‌های گردشده، پلاژیوکلاز با منطقه‌بندی نوسانی، بافت غربالی و حاشیه غبارآلود از بافت‌های نشان‌دهنده نبود تعادل و رویداد آمیزش ماگمایی (magma mixing) دانسته می‌شوند. در نمودارهای بهنجارسازی نسبت به ترکیب کندریت و گوشته اولیه، غنی‌شدگی از عناصر LREE و LILE و تهی‌شدگی از عناصر HREE و HFSE دیده می‌شود. این ویژگی از ویژگی‌های سنگ‌های کالک‌آلکالن و کمان‌های آتشفشانی وابسته به پهنه فرورانش است و می‌تواند نشان‌دهنده آرایش با مواد پوسته‌ای نیز باشد. مقادیر بالای La/Nb (۴/۳۶-۲) و آنومالی منفی Nb و Ti در نمودارهای عنکبوتی می‌توانند نشان‌دهنده آرایش پوسته‌ای در این سنگ‌ها باشند. نسبت Nb/La کم (۰/۲۳-۰/۵) و نسبت Sr/Ce بالا (۸/۴-۱۹) در نمونه‌های منطقه نیز نشان‌دهنده آرایش ماگمای سازنده سنگ‌ها با مواد پوسته‌ای است. این سنگ‌ها از ماگمای برآمده از ذوب‌بخشی گوشته غنی‌شده با نرخ ذوب ۱ تا ۵ درصدی یک خاستگاه اسپینل‌لرزلولیتی پدیده آمده‌اند.
واژه‌های کلیدی: زمین‌شیمی، سنگ‌های آتشفشانی، نابر، کاشان، ارومیه-دختر

مقدمه

کنگلومرها و ماسه‌سنگ آغاز شده است. فعالیت‌های آتشفشانی در نیمه اول دوران سوم بسیار شدید بوده و گاه بر سنگ‌های رسوبی نیز اثر گذاشته است. در

در بیشتر بخش‌های ایران مرکزی، دوران سنوزوییک با تکاپوهای کوهزایی لارامید در پالتوسن و با پیدایش

* tabataba@sci.ui.ac.ir

زمین‌شناسی منطقه

منطقه خاور نابر بخشی از رشته کوه هفت‌کتل است و از جنوب به رشته کوه سیاه‌کوه و از باختر به دشت نابر می‌رسد. روستای نابر در شمال این دشت و در کنار چمرود جای گرفته است. کهن‌ترین سنگ‌های منطقه خاور نابر سنگ‌های آذرین ائوسن هستند و جدیدترین آنها را نهشته‌های کواترنر می‌سازند (شکل ۱). سنگ‌های آذرین رنگ قهوه‌ای تیره دارند و به‌صورت خشن و توده‌ای، در پیدایش برجستگی‌ها نقش بسزایی داشته‌اند. سازندهای رسوبی به‌رنگ روشن هستند. توفه‌های سیلیسی، برش، شیل، مارن، سنگ‌های آذرآواری و گدازه‌های آندزیتی-بازالتی، آندزیتی، داسیتی و ریولیتی از سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی ائوسن هستند. ماسه‌سنگ، مارن، شیل‌های خاکستری، آهک‌های تیره‌رنگ همراه با سنگ‌های آذرین درونی (گابرو، گابرودیوریت، دیوریت و تونالیت) از سنگ‌های الیگوسن-میوسن هستند. تراورتن و ابرفت از نهشته‌های کواترنر منطقه خاور نابر هستند (Radfar and Alai Mahabadi, 1993). در این منطقه، سازندهای آهکی و ماسه‌سنگی قم از سنگ‌های آذرین ائوسن پایدارتر هستند. هر جا این دو گروه سنگی با هم دیده می‌شوند، ناهمواری‌های آذرین به‌صورت قله‌های پراکنده در سطح زمین نمایان شده‌اند؛ اما برجستگی‌های اصلی و پرتگاه‌های بلند در سازند قم جای گرفته‌اند. رخنمونی از سنگ‌های آذرین درونی در جنوب کوه هفت‌کتل است و در پی نفوذ آن در واحدهای آهکی سازند قم، اسکارن‌زایی در منطقه روی داده است (Abbasi, 2012).

روش انجام پژوهش

برای بررسی سنگ‌های آتشفشانی منطقه خاور نابر، پس از بازدیدهای صحرائی و نمونه‌برداری،

شهرستان کاشان، سنگ‌های آذرین و رسوبی به‌گونه متناوب پدید آمده‌اند؛ اما برتری با سنگ‌های آذرین است. این سنگ‌ها از گدازه‌های آندزیتی، ریولیتی و سنگ‌های آذرآواری پدید آمده‌اند و در پیدایش بخش‌های کوهستانی خاوری و باختری کاشان نقش بسزایی داشته‌اند (Abbasi, 2012). از دید پهنه‌های زمین‌ساختی، بلندی‌های جنوب و جنوب‌باختری کاشان بخشی از ایران مرکزی و پهنه آتشفشانی ارومیه - دختر به‌شمار می‌روند. در این منطقه، فعالیت شدید آتشفشانی از ائوسن آغاز شده و تا اندازه‌ای در سراسر این دوره روی داده است. آتشفشان‌های ائوسن به‌صورت آذرآواری، همراه با گدازه و میان‌لایه‌هایی از توفیت، ماسه‌سنگ، شیل و آهک، به‌گونه دگرشیب روی آهک‌های کرتاسه، دیده می‌شوند. در این منطقه گدازه‌های ائوسن بیشتر در باختر و جنوب‌باختری و سنگ‌های آذرآواری در شمال‌باختری قمر اهمیت دارند (Moinvaziri, 1996). منطقه خاور نابر در ۱۷۰ کیلومتری اصفهان و در خاور روستای نابر، در طول‌های جغرافیایی $51^{\circ}51'$ تا $51^{\circ}16'$ خاوری و عرض‌های جغرافیایی $33^{\circ}51'30''$ تا $33^{\circ}52'32''$ شمالی، جای دارد. از بررسی‌های انجام شده در این ناحیه می‌توان بررسی‌های سنگ‌شناسی و سنگ‌نگاری توده نفوذی خاور نابر (Abbasi, 2012) و بررسی اسکارن‌زایی (Javadi, 2012) را نام برد. این بررسی‌ها نشان می‌دهند که توده نفوذی این منطقه از نوع I و کالک‌آلکالن وابسته به پهنه‌های کوهزایی است. همچنین، اسکارن نابر از نوع کلسیک است و کانه‌های فلزی پیریت و کالکوپیریت در آن نشان‌دهنده فوگاسیته بالای گوگرد در محلول‌های کانه‌دار هستند. سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر، پیروکسن‌آندزیت، آندزیت، داسیت و ریولیت هستند. در این پژوهش سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر بررسی می‌شود.

اشتوتگارت آلمان، انجام شد. برگزیده‌ای از داده‌های به‌دست‌آمده در جدول‌های ۱ تا ۴ آورده شده‌اند. برای تجزیه سنگ‌ها، ۶ نمونه از سالم‌ترین سنگ‌های منطقه برگزیده شده و با روش ICP-MS در دانشگاه اشتوتگارت آلمان تجزیه شدند. بررسی و تفسیر داده‌ها و نمودارهای زمین‌شیمیایی، زمین‌ساختی و عنکبوتی سنگ‌کل با نرم‌افزارهای Word Perfect Office 2002، Newpet و PR20 انجام شده است.

جدول ۲- داده‌های برگزیده تجزیه ریزکاو الکترونی (بر پایه درصد وزنی) برای پلاژیوکلاز در سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان)، به‌همراه فرمول شیمیایی به‌دست آمده بر پایه ۸ اتم اکسیژن (بر پایه اتم در فرمول ساختاری) و درصد اعضای نهایی سازنده آنها.

Sample No.	33	31	31
Analysis Point	13	40	55
SiO ₂	64.80	59.02	53.55
TiO ₂	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	22.12	25.53	29.00
FeO*	0.39	0.23	0.46
MnO	0.00	0.00	0.00
MgO	0.08	0.02	0.02
CaO	2.94	7.76	12.20
Na ₂ O	9.43	7.20	4.70
K ₂ O	0.25	0.20	0.10
BaO	0.02	0.03	0.00
Total	100.01	99.98	100.03
Si	2.855	2.640	2.427
Ti	0.000	0.000	0.000
Al	1.148	1.345	1.548
Fe ²⁺	0.014	0.009	0.017
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000
Mg	0.005	0.001	0.001
Ca	0.139	0.372	0.593
Na	0.805	0.625	0.413
K	0.014	0.012	0.006
Ba	0.000	0.000	0.000
Cations	4.980	5.004	5.005
Albite	84.000	61.900	40.800
Anorthite	14.500	36.900	58.600
Orthose	1.500	1.200	0.600

نمونه‌های مناسبی برای بررسی‌های سنگ‌نگاری، برگزیده و در کارگاه مقطع‌سازی دانشگاه اصفهان مقاطع نازکی از آنها ساخته شد. این مقاطع با دستگاه میکروسکوپ پلاریزان OLYMPUS، مدل BH-2، بررسی شده و کانی‌شناسی و وابستگی بافتی آنها به یکدیگر شناسایی شده است. پس از آن، کانی‌ها و سنگ‌ها تجزیه شیمیایی شدند. تجزیه ریزکاو الکترونی کانی‌ها با دستگاه Cameca SX-100 و ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ kV، در دانشگاه

جدول ۱- داده‌های برگزیده تجزیه ریزکاو الکترونی (بر پایه درصد وزنی) برای کلینوپیروکسن در سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان)، به‌همراه فرمول شیمیایی به‌دست آمده بر پایه ۶ اتم اکسیژن (بر پایه اتم در فرمول ساختاری) و درصد اعضای نهایی سازنده آنها.

Sample No.	31	31	31
Analysis Point	12	43	96
SiO ₂	52.72	53.16	51.68
TiO ₂	0.00	0.06	0.00
Al ₂ O ₃	0.32	0.79	0.27
FeO*	8.74	5.02	6.21
MnO	0.18	0.80	0.92
MgO	13.35	15.13	15.52
CaO	24.44	24.65	25.25
Na ₂ O	0.17	0.16	0.13
K ₂ O	0.00	0.00	0.02
Total	99.91	99.76	99.99
Si	1.971	1.964	1.906
Ti	0.000	0.002	0.000
Al ^{IV}	0.014	0.034	0.012
Al ^{VI}	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.218	0.108	0.006
Fe ³⁺	0.056	0.047	0.186
Mn	0.006	0.025	0.029
Mg	0.744	0.833	0.853
Ca	0.979	0.976	0.998
Na	0.012	0.012	0.009
K	0.000	0.000	0.001
Cations	4.000	4.000	3.999
Wollastonite	50.178	47.791	48.174
Enstatite	40.691	43.616	41.197
Ferrosilite	9.131	8.592	10.629
Fe#	0.227	0.115	0.007
Mg#	0.773	0.885	0.993

جدول ۴- داده‌های برگزیده تجزیه ریزکاو الکترونی (بر پایه درصد وزنی) برای اکسید آهن، اکسید تیتانیم (روتیل) و اسفن در سنگ‌های آتشفشانی خاور ناب (جنوب‌باختری کاشان)، به همراه فرمول شیمیایی به دست آمده بر پایه ۲ و ۵ اتم اکسیژن برای روتیل و اسفن (بر پایه اتم در فرمول ساختاری).

Sample No.	31	31	31	31	31	31
Analysis Point	91	92	88	87	89	93
Mineral Type	Pyrrhotite	Pyrrhotite	Rutile	Sphene	Sphene	Sphene
SiO ₂	4.99	6.30	0.00	29.95	30.47	30.67
TiO ₂	0.03	0.00	94.41	37.96	37.75	33.90
Al ₂ O ₃	0.00	0.06	0.00	0.30	0.48	1.88
FeO*	75.62	74.92	0.80	0.80	0.72	2.30
MnO	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00
MgO	0.10	0.14	0.00	0.00	0.01	0.04
CaO	0.56	0.42	0.48	27.95	27.74	27.96
Na ₂ O	0.05	0.04	0.01	0.01	0.00	0.01
K ₂ O	0.02	0.05	0.01	0.01	0.00	0.33
BaO	0.01	0.01	3.17	0.00	0.00	0.00
Total	81.38	81.94	98.88	96.99	97.21	97.09
Si			0.000	1.011	1.023	1.037
Ti			0.992	0.963	0.953	0.863
Al			0.000	0.012	0.019	0.075
Fe ²⁺			0.009	0.023	0.020	0.065
Fe ³⁺			0.000	0.000	0.000	0.000
Mn			0.000	0.001	0.001	0.000
Mg			0.000	0.000	0.000	0.002
Ca			0.007	1.010	0.998	1.013
Na			0.000	0.001	0.000	0.001
K			0.000	0.000	0.000	0.014
Ba			0.000	0.000	0.000	0.000
Cations			1.008	3.021	3.014	3.070

جدول ۳- داده‌های برگزیده تجزیه ریزکاو الکترونی (بر پایه درصد وزنی) برای آمفیبول در سنگ‌های آتشفشانی خاور ناب (جنوب‌باختری کاشان)، به همراه فرمول شیمیایی به دست آمده بر پایه ۲۳ اتم اکسیژن (بر پایه اتم در فرمول ساختاری).

Sample No.	33	33	33
Analysis Point	16	17	19
SiO ₂	47.13	47.48	47.29
TiO ₂	0.84	0.93	0.86
Al ₂ O ₃	8.27	7.73	7.47
FeO*	16.38	16.20	16.20
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00
MnO	1.67	1.83	1.83
MgO	12.41	12.86	13.21
CaO	10.20	10.10	10.12
Na ₂ O	1.61	1.51	1.43
K ₂ O	0.29	0.19	0.22
Total	98.79	98.83	98.64
Si	6.725	6.742	6.717
Ti	0.090	0.099	0.092
Al ^{IV}	1.275	1.258	1.249
Al ^{VI}	0.114	0.035	0.000
Cr	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.590	0.420	0.306
Fe ³⁺	1.365	1.504	1.618
Mn	0.202	0.220	0.221
Mg	2.640	2.722	2.797
Ca	1.559	1.537	1.540
Na	0.446	0.415	0.394
K	0.052	0.034	0.041
Cations	15.057	14.985	14.975
Fe#	0.183	0.134	0.099
Mg#	0.817	0.866	0.901

آندزیت‌ها پلاژیوکلاز و آمفیبول از کانی‌های اصلی به‌شمار می‌روند. فراوانی کوارتز و بیوتیت در این سنگ‌ها کمتر است. داسیت‌ها و ریولیت‌ها دارای کانی‌های یکسان هستند و از پلاژیوکلاز، کوارتز، بیوتیت، پتاسیم‌فلدسپار و آمفیبول ساخته شده‌اند. تفاوت این سنگ‌ها در مقدار این کانی‌هاست؛ به این ترتیب که در داسیت‌ها، آمفیبول بیشتر و پتاسیم‌فلدسپار و کوارتز کمتر از ریولیت‌هاست.

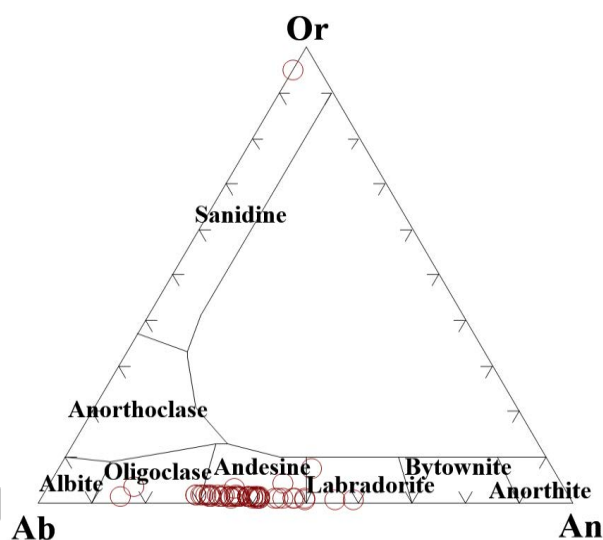
سنگ‌نگاری

بر پایه بررسی‌های سنگ‌شناسی، پیروکسن‌آندزیت، آندزیت، داسیت و ریولیت از سنگ‌های آتشفشانی خاور ناب هستند. بافت‌های پورفیری، گلوپورفیری، غربالی و میکرولیتی مهم‌ترین بافت‌های این سنگ‌ها به‌شمار می‌روند. کانی‌های پلاژیوکلاز و کلینوپیکروکسن کانی‌های اصلی پیروکسن‌آندزیت‌ها را می‌سازند و در

به باور Tsuchiyama (۱۹۸۵)، گرم‌شدن پلاژیوکلازها در دمای بالاتر از دمای ذوب (لیکیدوس) این فنوکریست‌ها را حل کرده و آنها را دچار گردش‌دگی می‌کند. بسیاری از پژوهشگران بافت‌های پس از جذب دوباره و منطقه‌بندی را به فرایند آمیزش ماگمایی (magma mixing) نسبت داده‌اند (Anderson, 1984; Halsor, 1989; Ginibre *et al.*, 2002; Wallace and Bergantz, 2002; Perugini *et al.*, 2005). فرایندهای جذب دوباره و رشد می‌توانند در طول زمان تکرار شوند و الگوهای منطقه‌بندی نوسانی را پدید آورند (Shelley *et al.*, 2012). به باور (Perugini and Poli, 2012) (۱۹۹۳)، پیدایش منطقه‌بندی در کانی‌ها در پی نبود تعادل کامل در هنگام تبلور روی می‌دهد و معمولاً این پدیده پیامد تبلور مذاب آتشفشانی است. به باور Nelson و Montana (۱۹۹۲)، بافت غربالی دیده‌شده در پلاژیوکلازها به تغییر ترکیب ماگمای در حال تبلور، به افزوده‌شدن ماگمای تازه به درون مخزن ماگمایی، کاهش فشار لیتواستاتیک در پی بالآمدن ماگما و افزایش فشار بخار آب در هنگام بالآمدن ماگما وابسته است. این شواهد در سنگ‌های مناطق دیگر، مانند منطقه قافلان کوه میانه، نیز گزارش شده است (Kamali *et al.*, 2011).

پلاژیوکلازهای دارای کناره‌های غبارآلود می‌توانند پیامد آمیزش ماگمایی، هضم بلورهای بیگانه پلاژیوکلاز به‌دست ماگمای نفوذی و یا کاهش ناگهانی فشار و تغییر فشار بخار آب در هنگام بالآمدن ماگما باشند (Gioncada *et al.*, 2006). نشانه‌های دگرسانی‌های سرسیتی‌شدن، سوسوریتی‌شدن (شکل ۳-F)، کائولینیتی‌شدن و کلسیتی‌شدن (شکل ۳-G)، در بسیاری از پلاژیوکلازها دیده می‌شود و گاه اپیدوت فراوانی از تجزیه آنها پدید آمده است (شکل ۳-H).

اپیدوت، اسفن، کلریت، کلسیت و کانی کدر از کانی‌های ثانویه سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر هستند. پلاژیوکلاز فراوان‌ترین کانی سازنده این سنگ‌هاست. بر پایه تجزیه پلاژیوکلازهای منطقه با ریزکاو الکترونی و در نمودار Ab-Or-An (Deer *et al.*, 1992)، ترکیب این کانی‌ها الیگوکلاز تا لابرادوریت است (شکل ۲).

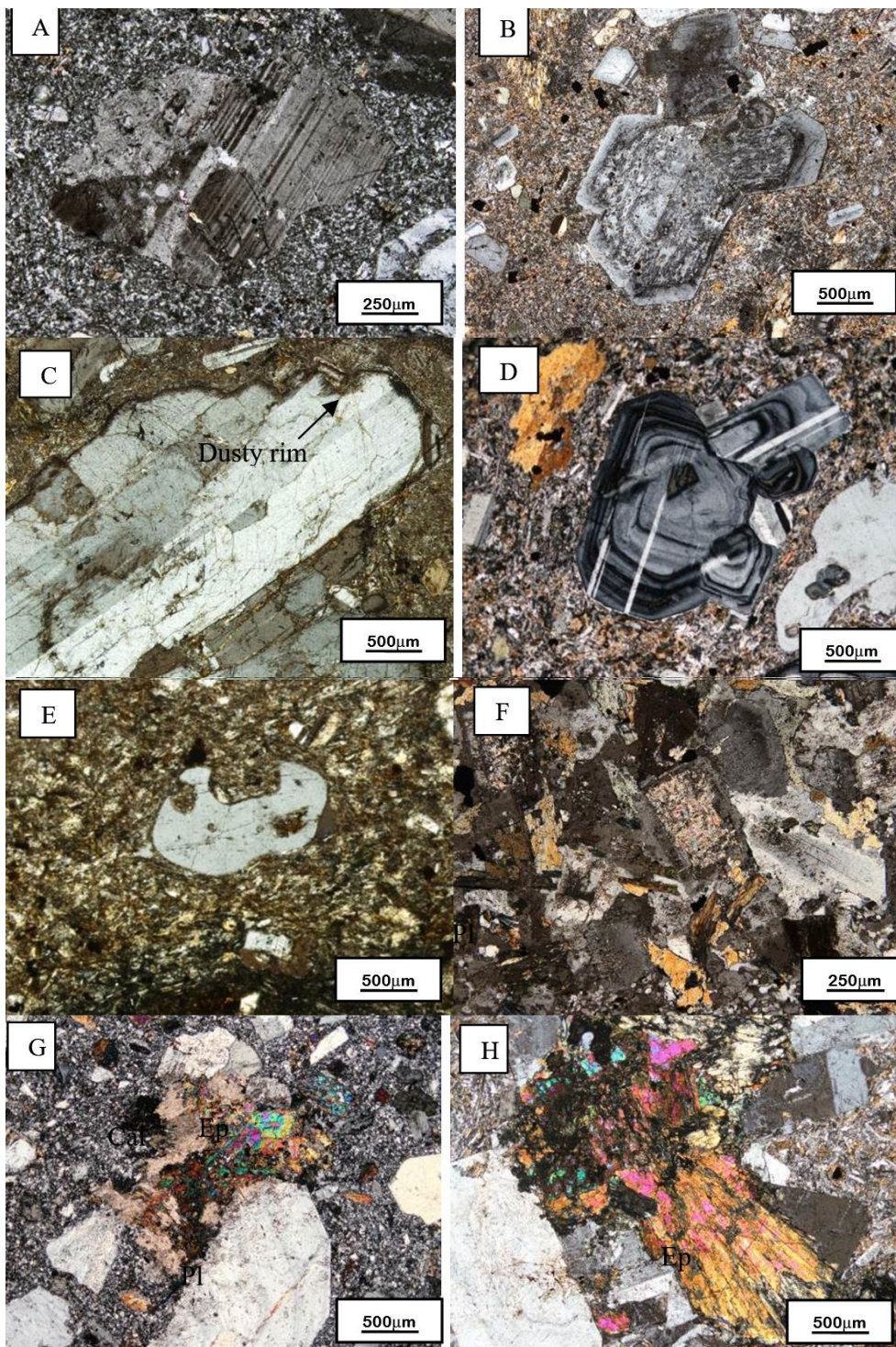


شکل ۲- پلاژیوکلازها در سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان) بر روی نمودار رده‌بندی فلدسپارها (Deer *et al.*, 1992).

در این سنگ‌ها، درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز به دو صورت دیده می‌شوند:

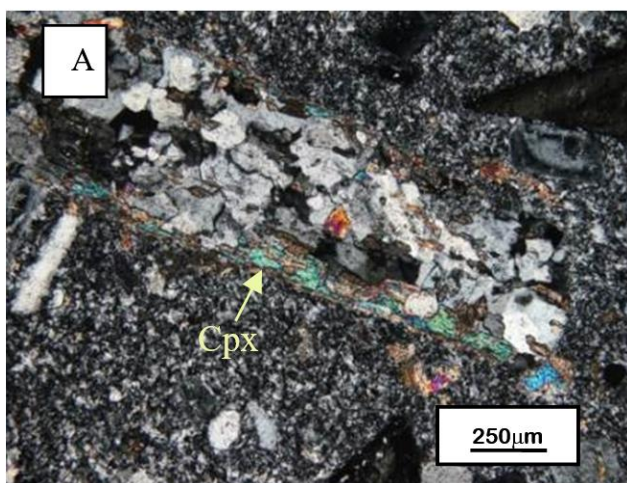
(۱) بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با ماکل پلی‌سنتتیک که گاه تجزیه شده و ماکل پلی‌سنتتیک آنها در پی تنش‌ها شکسته و جابه‌جا شده است (شکل ۳-A)؛

(۲) بلورهای پلاژیوکلاز با بافت غربالی (شکل ۳-B)، کناره‌های غبارآلود (شکل ۳-C) و منطقه‌بندی با تغییرات ترکیبی شدید (شکل ۳-D) که بیشتر آنها لبه‌های گردش‌ده و خوردگی خلیجی دارند؛ به‌گونه‌ای که این خوردگی شیمیایی گاه به کانی نمای آمیبی داده است (شکل ۳-E).

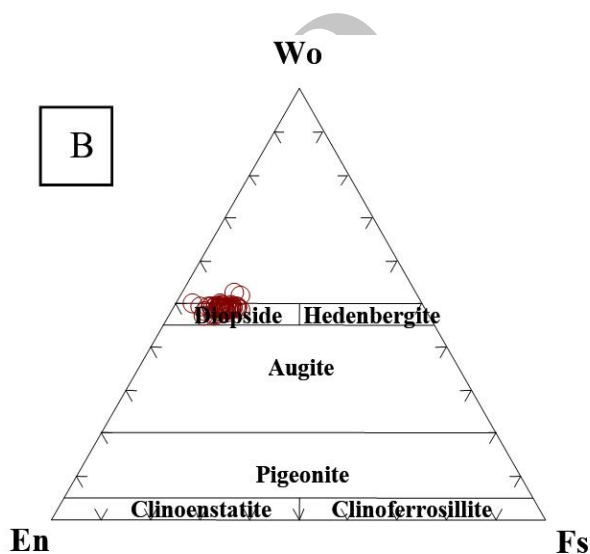


شکل ۳- تصویرهای میکروسکوپی XPL (cross polarized light) از سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان). (A) ماکل پلی‌سنتتیک در پلاژیوکلاز و شکسته شدن آن؛ (B) بافت غربالی در پلاژیوکلاز؛ (C) حاشیه غبارآلود در پلاژیوکلاز؛ (D) منطقه‌بندی نوسانی در پلاژیوکلاز؛ (E) خوردگی خلیجی در پلاژیوکلاز که به آن شکل آمیبی داده است؛ (F) دگرسانی از نوع سوسوریتی‌شدن در پلاژیوکلاز؛ (G) جایگزین شدن پلاژیوکلاز با کلسیت و اپیدوت؛ (H) انباشته شدن ناهنجار اپیدوت در برخی مقاطع که می‌تواند نشان‌دهنده هجوم سیال‌هایی باشد که دارای سازنده‌های اصلی آن بوده‌اند.

ریزک‌اوالکترونی کلینوپیروکسن‌ها و نمودار Morimoto و همکاران (۱۹۸۸)، کلینوپیروکسن این سنگ‌ها از نوع دیوپسید است (شکل ۴- B). SiO_2 و نیز Ti بسیار کم و کلسیم کمابیش بالا در این کلینوپیروکسن‌ها می‌توانند نشان‌دهنده پیدایش این سنگ‌ها در پهنه‌های کوهزایی وابسته به کمان‌های آتشفشانی باشند.



کلینوپیروکسن کانی مافیک در پیروکسن آندزیت‌های منطقه خاور نابر است. این کانی بیشتر دچار فرایندهای دگرسانی شده و با کلسیت، اسفن، ترمولیت-کتینولیت و کانی کدر جایگزین شده است. گاه سودومورف‌هایی از این کانی دیده می‌شوند که با پلاژیوکلاز و کوارتزهای ریزدانه پر شده‌اند (شکل ۴- A). بر پایه تجزیه

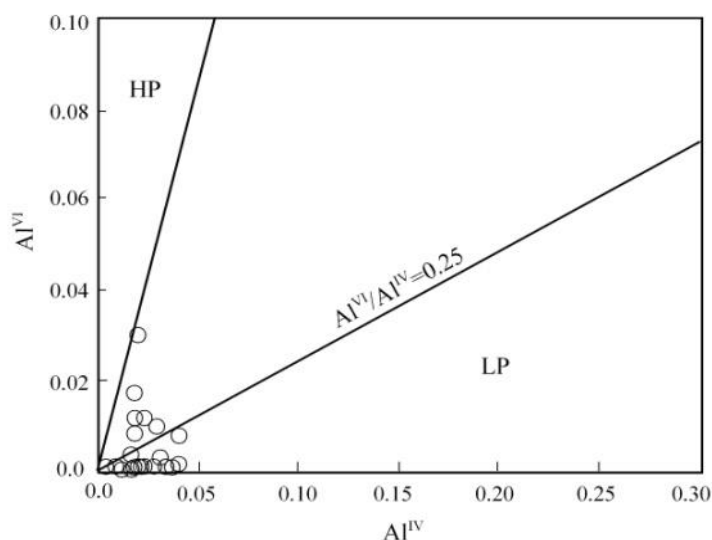


شکل ۴- کلینوپیروکسن در سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان). (A) تصویر میکروسکوپی از ناپایداری کلینوپیروکسن در برابر پلاژیوکلاز (تصویر XPL؛ B) کلینوپیروکسن‌ها در نمودار رده‌بندی کلینوپیروکسن (Morimoto *et al.*, 1988) از نوع دیوپسید هستند.

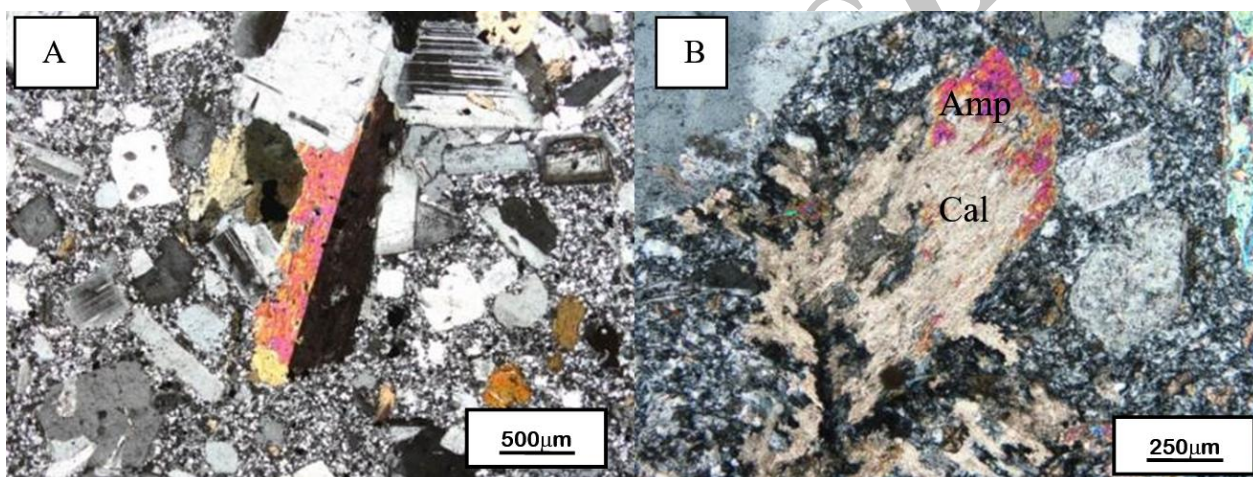
می‌شود. ماکل کارلسباد و کمربندی در برخی از آمفیبول‌ها نشان‌دهنده نخستین و آذرین بودن آنهاست (شکل ۶- A). فرایند دگرسانی کلریتی‌شدن و کلسیتی‌شدن در این بلورهای آمفیبول دیده می‌شود (شکل ۶- B). همچنین، آمفیبول‌ها گاه در حال جایگزین شدن با بیوتیت هستند. در سنگ‌های داسیتی و ریولیتی، بیوتیت از فراوانی بیشتری برخوردار است. این کانی دارای بلورهای منفرد با رخ‌های نازک و به‌رنگ قهوه‌ای تیره و چندرنگی قوی دیده می‌شود و گاه در پی تجزیه با کلریت جایگزین شده‌اند.

میزان Al^{IV} با افزایش آب در محیط تبلور پیروکسن‌ها کاهش می‌یابد. بر پایه نمودار Al^{IV} برابر Al^{VI} (Aoki and Shiba, 1973)، این کلینوپیروکسن‌ها در فشارهای متوسط تا کم پدید آمده‌اند که نشان می‌دهد تبلور پیروکسن‌ها در هنگام بالآمدن از اعماق به‌سوی سطح رخ داده است (شکل ۵).

در این سنگ‌ها، آمفیبول‌ها شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و گاه بی‌شکل هستند. این کانی در مقاطع طولی با یک دسته رخ و در مقاطع عرضی با دو دسته رخ و به‌صورت شش گوش دیده



شکل ۵- کلینوپیروکسن در سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان) در نمودار Al^{VI} در برابر Al^{IV} (Aoki and Shiba, 1973). نمونه‌ها در گستره فشارهای کم تا متوسط جای گرفته‌اند.



شکل ۶- تصویر میکروسکوپی XPL از آمفیبول در سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان). (A) ماکل کارلسباد در بلور آمفیبول؛ (B) کلسیتی شدن آمفیبول.

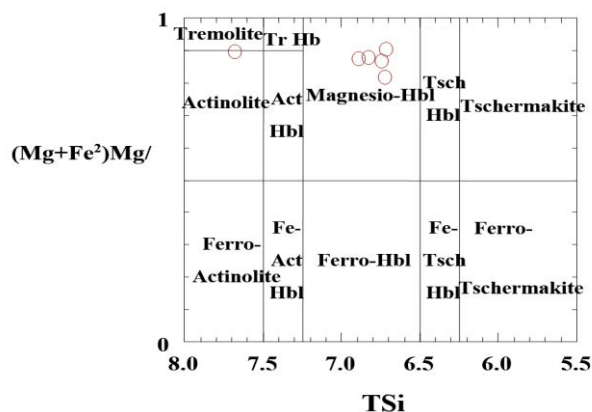
آمفیبول‌های آذرین جای می‌گیرند. کوارتز و پتاسیم‌فلدسپار از دیگر کانی‌های داسیت‌ها و ریولیت‌ها به‌شمار می‌روند. در نمونه ریولیتی رشد این کانی‌ها همراه با هم، بافتی شبیه به بافت گرافیک پدید آورده که نشان‌دهنده رشد این سنگ در درون زمین و نزدیک به سطح است (Shelley, 1993)؛ پس این سنگ‌ها نیمه‌درونی (subvolcanic) هستند (شکل ۸). تجزیه ریزکاو الکترونی اسفن، روتیل و کانی‌های کدر در این سنگ‌ها در جدول ۴ آورده شده است. کانی‌های کدر ترکیب پیرویت دارند.

بر پایه رده‌بندی Leake و همکاران (۱۹۹۷)، آمفیبول‌هایی که در آنها $(Ca+Na)_B \geq 1$ و $Na_B < 0.5$ است از گروه آمفیبول‌های کلسیک هستند. تجزیه ریزکاو الکترونی نشان می‌دهد، آمفیبول‌ها مگنزیم‌یوهورنبلند بوده، از گروه آمفیبول‌های کلسیک هستند (شکل ۷). اگر Al^{IV}/Al^{VI} در آمفیبول‌ها بیشتر از ۳/۳ باشد، از آمفیبول‌هایی با خاستگاه ماگمایی هستند (Fleet and Barnett, 1978).

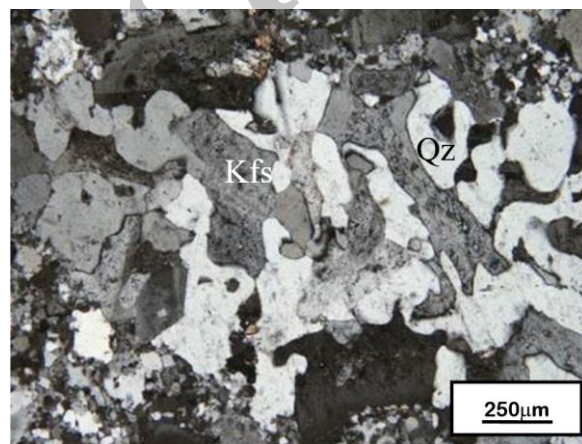
بر پایه این نکته، آمفیبول‌های این منطقه، با Al^{IV}/Al^{VI} برابر ۱۱/۱۸ و ۳۵/۹۴، در گروه

ماگمایی آلکالن و ساب‌آلکالن از یکدیگر بهره گرفت. این نمودار نشان می‌دهد که این سنگ‌ها ساب‌آلکالن هستند (شکل ۱۰). بر پایه نمودار سه‌تایی AFM (Irvine and Baragar, 1971) (شکل ۱۱) و نمودار Ta/Yb در برابر Ce/Yb (Pearce, 1983) (شکل ۱۲)، سری ماگمایی سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر کالک‌آلکالن است. برای رده‌بندی ماگماها بر پایه درجه اشباع‌شدگی آلومین، نمودار (Maniar and Piccoli, 1989) به کار برده شد. در این نمودار، نمونه‌های منطقه خاور نابر در گستره متا‌آلومینوس جای گرفته‌اند (شکل ۱۳).

برای بررسی تغییرات فراوانی عناصر در یک سری ماگمایی در هنگام تفریق، نمودارهای هارکر (Harker, 1909) به کار برده می‌شود. در این نمودارها رفتار SiO_2 در برابر عناصر اصلی بررسی می‌شود. با توجه به این نمودارها، اکسیدهای Al_2O_3 ، CaO ، MgO ، Fe_2O_3 ، TiO_2 و P_2O_5 با SiO_2 رابطه وارونه دارند و با افزایش مقدار SiO_2 مقدار آنها کاهش می‌یابد. روند کاهش تبلوربخشی کلینوپیروکسن و اکسیدهای آهن و تیتانیوم وابسته است. روند کاهش Al_2O_3 و CaO به تبلور و جدایش پلاژیوکلاز بستگی دارد و در هنگام تبلوربخشی ماگما، ترکیب پلاژیوکلازها از کلسیک به سوی سدیک می‌رود. مقدار K_2O با افزایش SiO_2 افزایش می‌یابد. افزایش میزان SiO_2 همراه با غنی‌شدگی K_2O و تهی‌شدگی MgO و CaO می‌تواند در پی تبلور هورنبلند، پلاژیوکلاز و پیروکسن روی دهد (شکل ۱۴). این سنگ‌ها به ترکیب کندریت و گوشته نخستین (Sun and McDonough, 1989) بهنجار سازی شده‌اند.



شکل ۷- آمفیبول‌های سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان) در نمودار رده‌بندی آمفیبول‌ها (Leake *et al.*, 1997) از نوع مگنزیوهورنبلند و ترمولیت هستند.



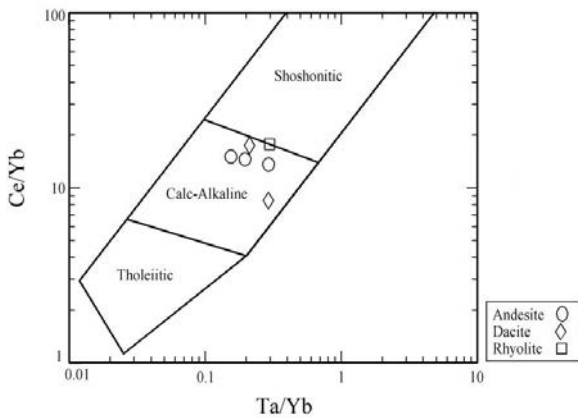
شکل ۸- تصویر میکروسکوپی XPL از رشد پتاسیم‌فلدسپار همراه با کوارتز در سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان).

زمین‌شیمی

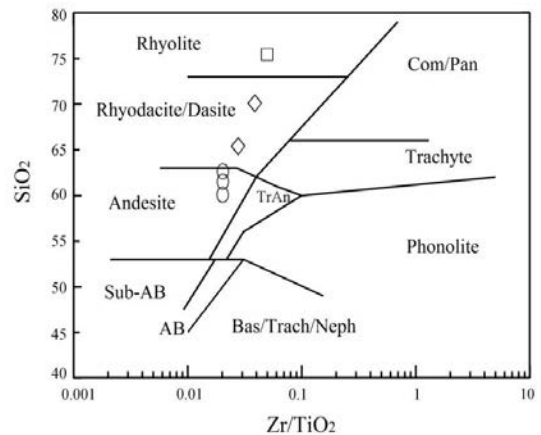
داده‌های تجزیه شیمیایی ۶ نمونه از سنگ‌های آتشفشانی منطقه خاور نابر (عناصر اصلی، فرعی و کمیاب) در جدول ۵ آورده شده‌اند. در نمودار Zr/TiO_2 در برابر SiO_2 (Winchester and Floyd, 1977)، این نمونه‌ها در بخش آندزیت، داسیت و ریولیت جای گرفته‌اند (شکل ۹). از نمودار سیلیس در برابر آلکالی‌ها (Irvine and Baragar, 1971) می‌توان برای شناسایی دو سری

جدول ۵- داده‌های تجزیه شیمیایی به روش ICP-MS برای سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان).

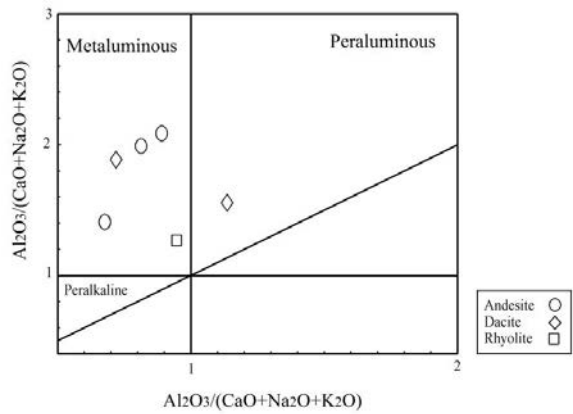
Sample No.	Nab1-25	Nab1-14	Nab1-34	Nab1-6	Nab1-4	Nab1-10
Rock type	Rhyolite	Dacite	Dacite	Andesite	Andesite	Andesite
wt%						
SiO ₂	72.6	67.7	63.8	62.8	61.2	59.33
TiO ₂	0.16	0.36	0.45	0.5	0.5	0.52
Al ₂ O ₃	12.6	14.2	16.6	14	17.12	17.6
Fe ₂ O ₃ *	1.12	3.87	1.68	5.1	5.44	6.7
MnO	0.02	0.04	0.08	0.06	0.2	0.2
MgO	0.37	1.02	1.83	1.2	1.4	1.4
CaO	1.86	3.18	7.96	6	6.1	7.05
Na ₂ O	3.2	3.5	4.9	5.6	4.55	4.95
K ₂ O	4.31	3.2	0.69	0.61	0.6	0.57
P ₂ O ₅	0.02	0.06	0.18	0.26	0.23	0.25
Cr ₂ O ₃	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
LOI	0.45	0.53	0.61			
Total	96.8	97.6	98.8	96.14	97.35	98.6
ppm						
Ni	11	8	5			
Co	2	5.3	1.5	75	68	38
V	19	41	49	20.7	25.3	26
Cu	29	14	15			
Zn	14	25	19	42.75	38.7	41
Sn	2	1	2	1	0.5	0.66
W	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Mo	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Rb	64.8	53.8	12.7	4.51	4.16	2.85
Cs	0.7	0.7	0.2	1.92	1.5	1.4
Ba	590	570	190	90.4	275	375
Sr	260	270	660	421	632	635
Ga	9	12	16	14.7	15.21	15.7
Ta	0.5	0.5	0.5	0.69	0.47	0.4
Nb	4	4	5	4.3	4	4.2
Hf	4	4	4	3.4	3	3
Zr	80	120	120	115.6	101.3	105
Y	11	12	20	18	18	20
Th	24.9	11.3	7.6	3.8	5.1	5.2
U	5.91	2.11	1.92	1.1	1.75	1.46
La	14.6	8.1	21.8	14.12	14.8	16.8
Ce	30.8	14.2	40.3	31.6	35.6	38.2
Pr	3.33	1.81	4.74	3.8	3.7	4.35
Nd	10.7	7.1	18.4	16.57	15.96	18.4
Sm	1.6	1.7	3.7	3.6	3	4
Eu	0.34	0.61	0.89	1.15	1.17	1.2
Tl	0.5	0.5	0.5	0.42	0.39	0.34
Gd	1.35	1.77	3.24	3.8	3.66	4.2
Tb	0.25	0.32	0.59	0.59	0.6	0.65
Dy	1.64	2.1	3.61	3.5	3.46	3.8
Ho	0.37	0.46	0.77	0.74	0.73	0.82
Ag	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Er	1.28	1.56	2.38	2.2	2.2	2.4
Tm	0.22	0.22	0.36	0.35	0.35	0.4
Yb	1.7	1.6	2.4	2.4	2.4	2.6
Lu	0.28	0.29	0.36	0.39	0.4	0.4



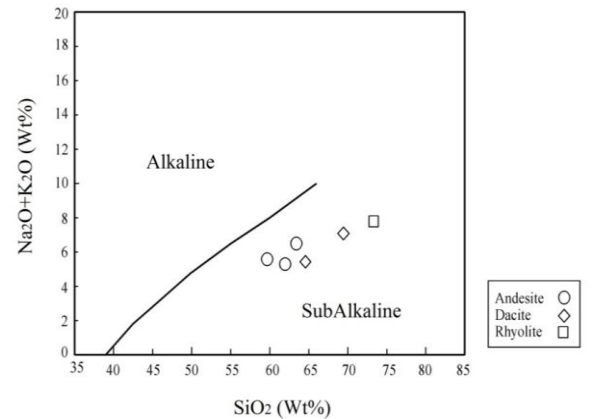
شکل ۱۲- جایگاه سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان) در نمودار Ta/Yb در برابر Ce/Yb (Pearce, 1983).



شکل ۹- جایگاه سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان) در نمودار Zr/TiO₂ در برابر SiO₂ (Winchester and Floyd, 1977).

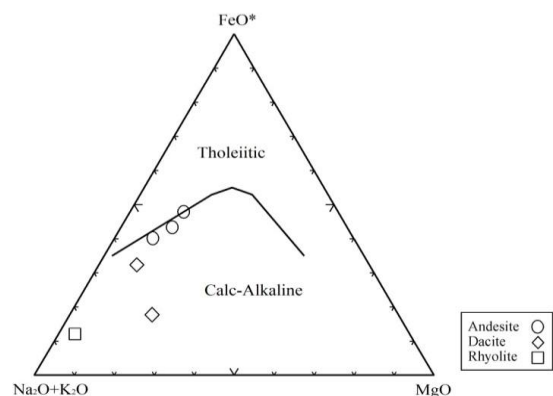


شکل ۱۳- جایگاه سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان) در نمودار شناسایی سنگ‌های ماگمایی بر پایه اندازه آلومین (Maniar and Piccoli, 1989).



شکل ۱۰- سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان) در نمودار آلکالی‌ها در برابر SiO₂ (Irvine and Baragar, 1971) در بخش ساب‌آلکالن جای گرفته‌اند.

بر پایه شکل ۱۵-A، این سنگ‌ها دارای غنی‌شدگی از LREE در برابر HREE هستند. این غنی‌شدگی، به‌همراه مقدار TiO₂، Zr و Nb کم نمونه‌ها، وابستگی این سنگ‌ها به سری ماگمایی کالک‌آلکالن را نشان می‌دهد (Machado *et al.*, 2005). به باور Gill (۲۰۱۰)، این پدیده از ویژگی‌های آشکار سنگ‌ها در پهنه‌های فرورانش است. چنین ویژگی‌هایی در سنگ‌های آتشفشانی و نیمه‌درونی قویشاد بیرجند نیز گزارش شده است (Zarrinkoub *et al.*, 2011) عناصر LREE

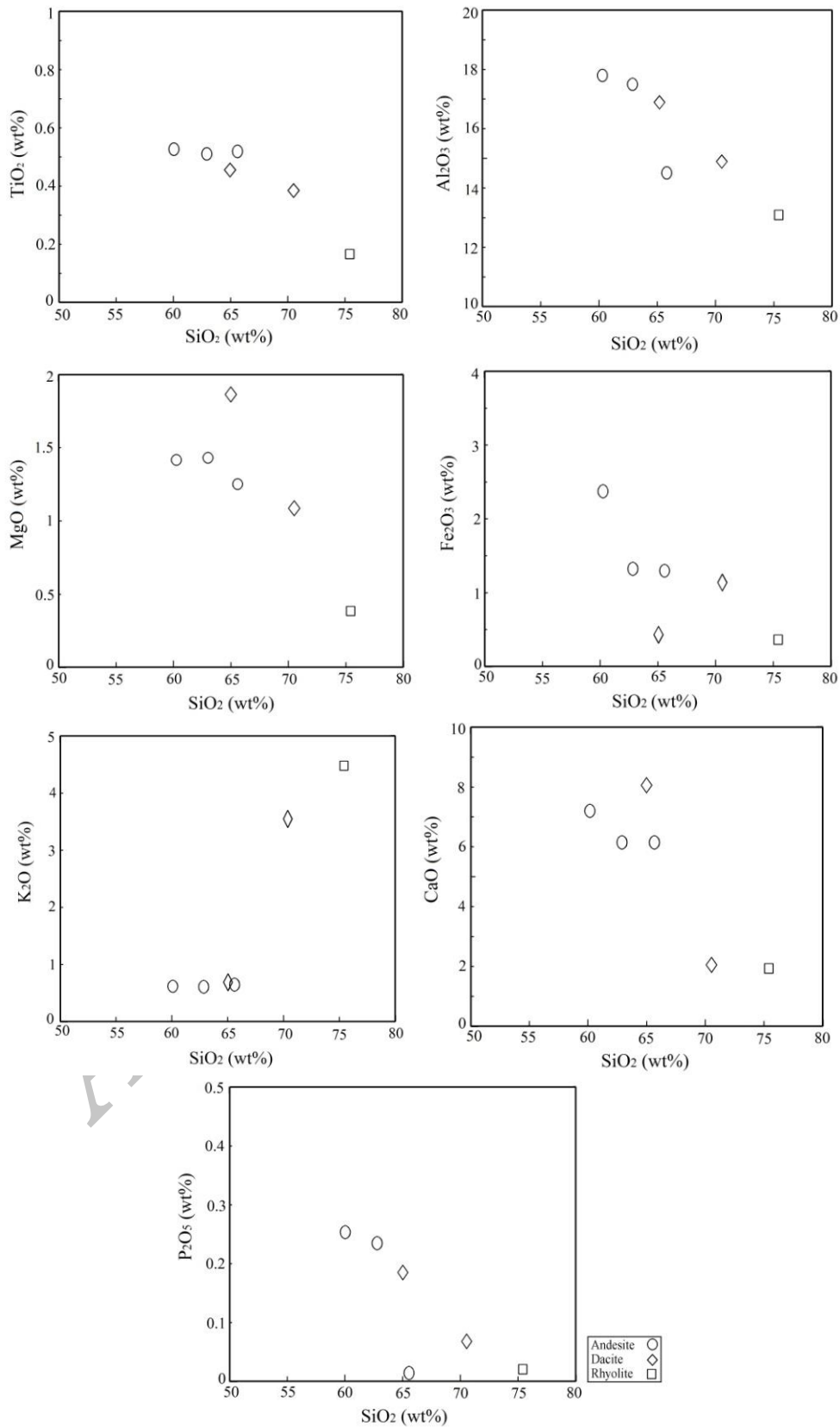


شکل ۱۱- جایگاه سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان) در نمودار سری‌های ماگمایی کالک‌آلکالن (Irvine and Baragar, 1971) در گستره کالک‌آلکالن‌هاست.

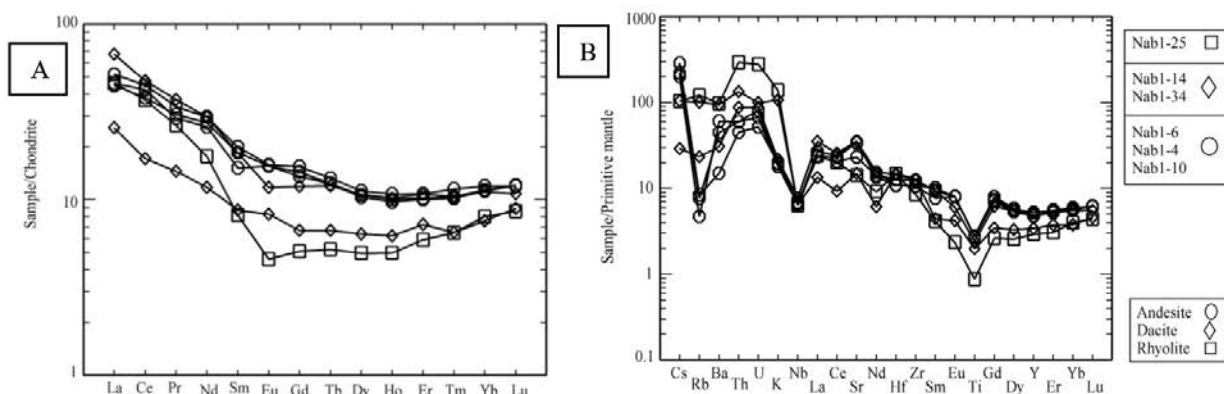
هستند و به دست سیال‌های برخاسته از پهنه فرورانش روی می‌دهند (Rollinson, 1993; Peng *et al.*, 2007). همچنین، کاهش Ta و Nb، Ti (TNT) را می‌توان پیامد جدایش کانی‌های تیتانیم‌دار (مانند اسفن و ایلمنیت) دانست. مقادیر La/Nb بالا (۴-۱) در سنگ‌ها و آنومالی منفی Ti و Nb در نمودارهای عنکبوتی می‌تواند نشان‌دهنده آرایش با مواد پوسته‌ای باشد (Reichew *et al.*, 2004). این مقدار برای سنگ‌های این منطقه نزدیک به ۲ تا ۴/۳۶ ppm است. بر پایه Rollinson (۱۹۹۳)، آنومالی مثبت Sr در سنگ‌های منطقه خاور نابر می‌تواند نشان‌دهنده شرکت پلاژیوکلاز در هنگام ذوب‌بخشی سنگ خاستگاه و یا تبلور پلاژیوکلازهای کلسیک در این گدازه‌ها باشد. در مقایسه‌ای که میان سنگ‌های این منطقه و سنگ‌های آتشفشانی تفریتی و آلکالی‌بازالتی منطقه طالقان انجام شد، سنگ‌های منطقه طالقان از عناصر Pb، LILE و Sr در برابر عناصر LREE غنی‌شدگی و از عناصر HFSE در برابر عناصر ناسازگار دیگر تهی‌شدگی نشان می‌دهند (Ahmadi *et al.*, 2011). همچنین، گاه این سنگ‌ها نیز، همانند سنگ‌های خاور نابر، تهی‌شدگی عنصر Eu نشان نمی‌دهند. با توجه به فراوانی کانی پلاژیوکلاز و تبلور گسترده آن، این پدیده می‌تواند پیامد فوگاسیته بالای اکسیژن در ماگما باشد؛ زیرا که در این شرایط ضریب توزیع عنصر Eu در فلدسپارها، همانند عناصر REE دیگر خواهد بود (Rollinson, 1993).

ناسازگارتر از عناصر HREE هستند، پس در سیال به‌جای مانده LREE بیشتر از HREE است (Krauskopf and Bird, 1976). فراوانی LREE‌ها، به‌علت تحرک بسیار، به رفتار سیال بستگی دارد (Rollinson, 1993)؛ اما از آنجایی که این عناصر در پوسته قاره‌ای متمرکز شده‌اند، چه‌بسا فراوانی آنها در ماگما نشان‌دهنده آرایش مذاب با مواد پوسته‌ای باشد (Almeida *et al.*, 2007). ناهنجاری Eu، به‌ویژه در ماگمای فلسیک بیشتر به‌دست فلدسپارها کنترل می‌شود؛ زیرا اگرچه REE‌های سه‌ظرفیتی در پلاژیوکلاز و پتاسیم‌فلدسپار عناصر ناسازگارند؛ اما Eu در حالت دو ظرفیتی عنصری سازگار به‌شمار می‌آید. از این‌رو، جدایش فلدسپار از مذاب می‌تواند باعث ناهنجاری منفی Eu در مذاب شود. آنومالی منفی Eu در سنگ‌های فلسیک منطقه پیامد تبلور پلاژیوکلازهای کلسیم‌دار است.

در شکل ۱۵-B نیز غنی‌شدگی از عناصر LILE نسبت به HFSE دیده می‌شود. عناصر LILE پتانسیل یونی بالایی دارند و در فشار و دمای بالا در سیال‌های آبدار به‌آسانی حل می‌شوند و انتقال می‌یابند؛ اما انحلال‌پذیری عناصر HFSE در سیال‌های آبدار کم است (Tatsumi *et al.*, 1986). از این‌رو، در هنگام ذوب‌بخشی، عناصر LILE نسبت به HFSE غنی‌شوند (Green, 2006). تهی‌شدگی از عناصر Ta و Nb، Ti و غنی‌شدگی از Cs، Sr، Ba، Th و U از ویژگی‌های ماگماهای وابسته به پهنه کمان‌های آتشفشانی



شکل ۱۴- نمودارهای هارکر اکسیدهای عناصر اصلی در برابر SiO₂ برای سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان).

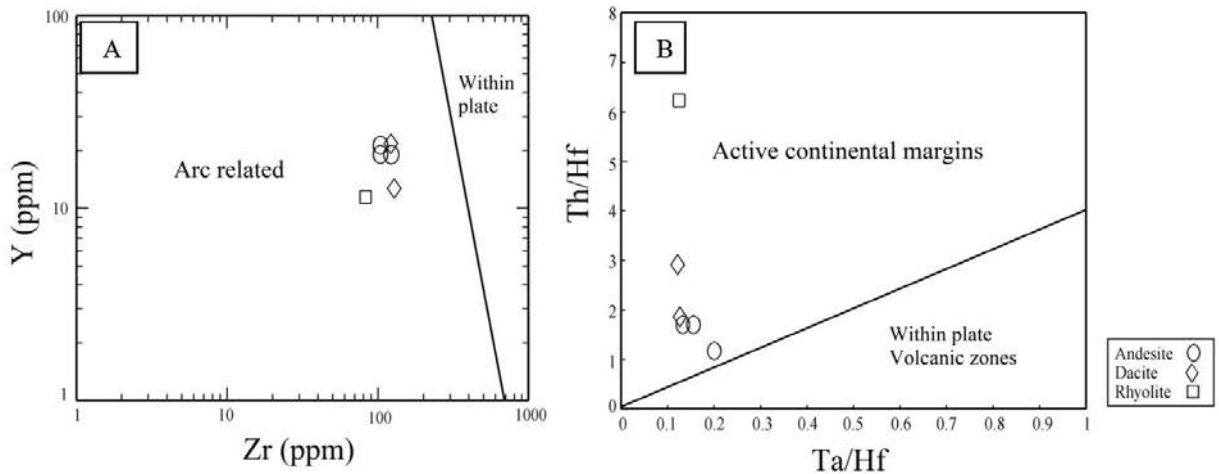


شکل ۱۵- سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان) در: (A) نمودار عناصر خاکی نادر بهنجار شده به ترکیب کندریت (Sun and McDonough, 1989)؛ (B) نمودار عنکبوتی بهنجار شده به ترکیب گوشته نخستین (Sun and McDonough, 1989).

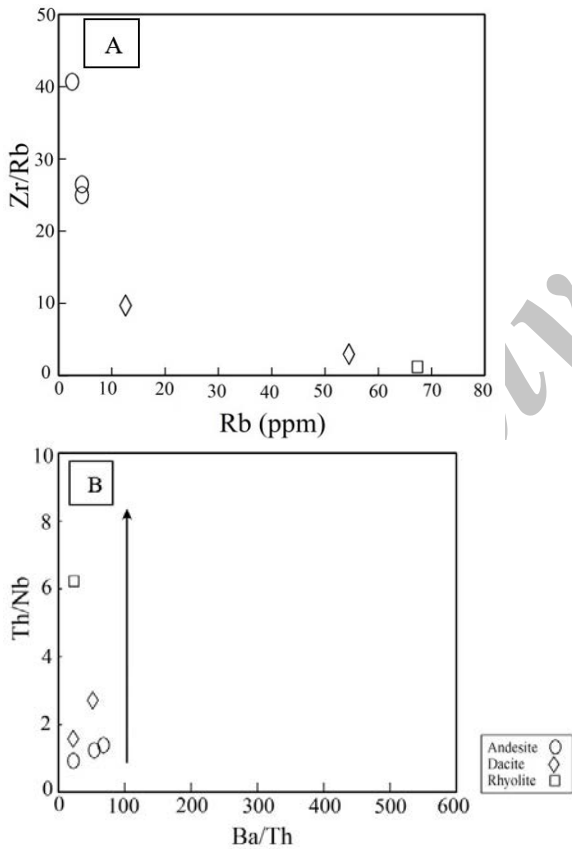
از نسبت عناصر کمیاب Zr/Y نیز می‌توان برای شناسایی پهنه زمین‌ساختی بهره برد (Pearce and Norry, 1979)، بدین‌گونه که اگر در ترکیب شیمیایی سنگ‌ها نسبت $Zr/Y > 3$ باشد، ماگما به کمان‌های آتشفشانی قاره‌ای وابسته است و اگر نسبت $Zr/Y < 3$ باشد، به کمان‌های آتشفشانی اقیانوسی وابسته است. این نسبت برای سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر $5/2$ تا $9/4$ است. از این‌رو، این سنگ‌ها در پهنه کمان‌های آتشفشانی قاره‌ای پدید آمده‌اند. با نسبت Zr/Nb می‌توان سنگ‌های وابسته به پهنه فرورانش و کوهزایی را از غیرکوهزایی جدا کرد. بدین‌گونه که اگر نسبت Zr/Nb بیشتر از ۱۰ باشد، نشان‌دهنده ماگماتیسم وابسته به پهنه فرورانش است و هنگامی که این نسبت کمتر از ۱۰ باشد، نشان‌دهنده خاستگاه غیرکوهزایی سنگ‌هاست (Sommer *et al.*, 2006). این نسبت برای سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر ۲۰ تا ۳۰ بوده و نشان‌دهنده خاستگاه کوهزایی و وابسته به پهنه فرورانش برای این سنگ‌هاست.

سنگ‌زایی و شناسایی پهنه زمین‌ساختی پیدایش سنگ‌ها

شناخت جایگاه زمین‌ساختی در تفسیر سنگ‌زایی (پتروژنز) سنگ‌ها بسیار کارآمد است. از این‌رو، نمودارهای شناسایی که بر پایه عناصر نامتحرک یا کم‌تحرک باشند، به‌کار می‌روند. با توجه به این که عناصر با شدت میدان بالا، مانند Zr ، Nb و Y ، Ti در سیال‌های آبی تا اندازه‌ای نامتحرک بوده و در شرایط گرمایی، هوازدگی و دگرگونی درجه بالا پایدار هستند، این عناصر کاربرد بسیاری دارند. برای شناخت جایگاه زمین‌ساختی ماگمای (تکتونوماگماتیک) سازنده سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر از نمودار Zr برابر Y (LeMaitre *et al.*, 1989) بهره گرفته شد. این نمودار نشان می‌دهد که این سنگ‌ها در پهنه زمین‌ساختی وابسته به کمان ماگمایی پدید آمده‌اند (شکل ۱۶- A). همچنین، در نمودار Ta/Hf در برابر Th/Hf (Schandl and Gorton, 2002)، سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر در پهنه حاشیه فعال قاره‌ای جای گرفته‌اند (شکل ۱۶- B).



شکل ۱۶- سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان): در: (A) نمودار Zr در برابر Y (LeMaitre et al., 1989) و (B) نمودار Ta/Hf در برابر Th/Hf (Schandl and Gorton, 2002).



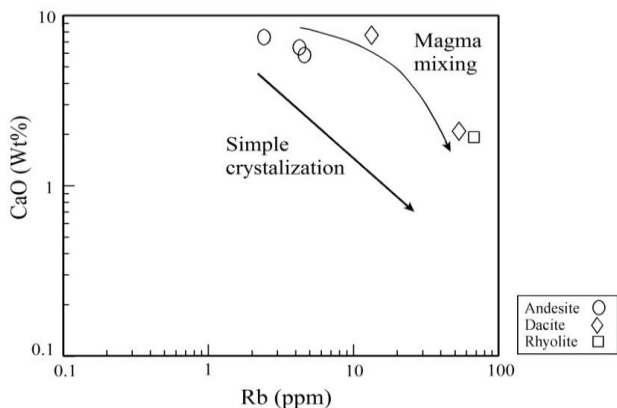
شکل ۱۷- سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان): در: (A) نمودار Rb در برابر Zr/Rb (DePaolo, 1981) و روند نزولی که نشان‌دهنده آغشتگی پوسته‌ای در این سنگ‌هاست؛ (B) نمودار Ba/Th در برابر Th/Nb (Orozco Esquivel et al., 2007).

بررسی فرایندهای مؤثر در تحول ماگما

ماگما در هنگام تکامل و بال‌آمدن دستخوش فرایندهای گوناگونی می‌شود. این فرایندها مانند جدایش بلورین، آمیزش ماگمایی، هضم، آرایش و آغشتگی هر یک می‌توانند مسیر خاصی را در روند تحول پدید آورند. این پدیده‌ها ممکن است هم‌زمان روی داده و اثر یکدیگر را افزایش یا کاهش بدهند.

DePaolo (۱۹۸۱) بر این باور است که عناصر Zr و Rb نسبت به فرایند آغشتگی پوسته‌ای واکنش نشان می‌دهند و در پی آغشتگی با پوسته نسبت Zr/Rb در برابر Rb کاهش می‌یابند. با توجه به این نکته، نمودار Rb در برابر Zr/Rb (DePaolo, 1981) برای شناسایی نقش آرایش پوسته‌ای در پیدایش سنگ‌ها به کار گرفته شد. روند کاهشی در این نمودار نشان می‌دهد که سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر دچار فرایند آغشتگی پوسته‌ای شده‌اند (شکل ۱۷- A). همچنین، در نمودار Ba/Th در برابر Th/Nb (Orozco Esquivel et al., 2007)، مقادیر کم این نسبت‌ها نشان‌دهنده مشارکت اندک فرآورده‌های پهنه فرورانش (محلول‌ها و مواد مذاب) و تأثیر آلودگی پوسته‌ای در پدید آمدن این سنگ‌هاست (شکل ۱۷- B).

این نمودار، نمونه‌های این منطقه در گستره آمیزش ماگمایی جای گرفته‌اند (شکل ۱۹).

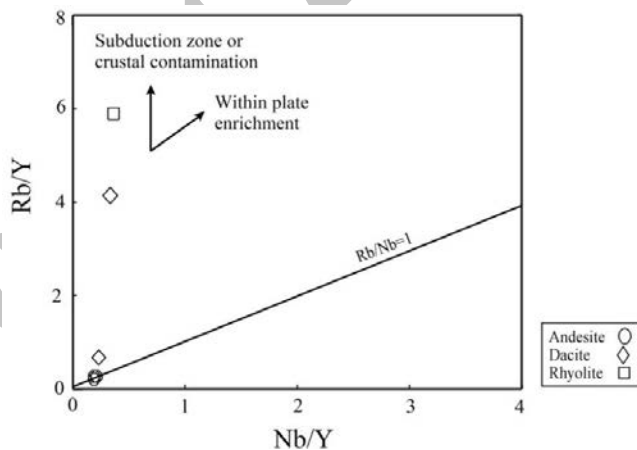


شکل ۱۹- جایگاه سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان) در نمودار Rb در برابر CaO (Yanagi and Yamashita, 1994) در محدوده آرایش و اختلاط ماگمایی است.

الگوی آرایش پوسته‌ای

برای الگوسازی آرایش پوسته‌ای، از نسبت La/Sm بهره‌گرفته شده است (DePaolo, 1981) (شکل ۲۱). این الگو درجه تبلوربخشی را برای مقادیر گوناگون r نشان می‌دهد و منحنی‌های قطری برای مقادیر گوناگون r به دست آمده است. r نشان‌دهنده میزان آرایش پوسته‌ای در برابر میزان تبلور است. هر چه ترکیب سنگ‌ها به ترکیب پوسته نزدیک‌تر باشد، r بیشتر می‌شود (Keskin *et al.*, 1998). در این نمودار، جای گرفتن نمونه‌های منطقه نابر میان منحنی‌های $r = 0.1$ تا بالاتر از $r = 0.7$ نشان‌دهنده اهمیت آرایش پوسته قاره‌ای در پیدایش این سنگ‌هاست (شکل ۲۰). این نسبت در سنگ‌های آتشفشانی مناطق دیگر، مانند طالقان، ۰/۱۵ تا ۰/۴۵ گزارش شده است (Ahmadi *et al.*, 2011).

همچنین، روند عمودی در نمودار Nb/Y برابر Rb/Y (Pearce, 1983) نشان‌دهنده پهنه فرورانش غنی‌شده و یا آلودگی پوسته‌ای است (شکل ۱۸). مقادیر نسبت Nb/La در این سنگ‌ها ۰/۲۳ تا ۰/۵ است و مقادیر نسبت Sr/Ce نیز در این سنگ‌ها ۸/۴ تا ۱۹ است. نسبت Nb/La کم (کمتر از ۰/۷) و نسبت Sr/Ce بالا (بیشتر از ۵) در نمونه‌های این منطقه نیز نشان‌دهنده درگیربودن پوسته در ماگمای سازنده این سنگ‌ها هستند (Jung *et al.*, 2004).

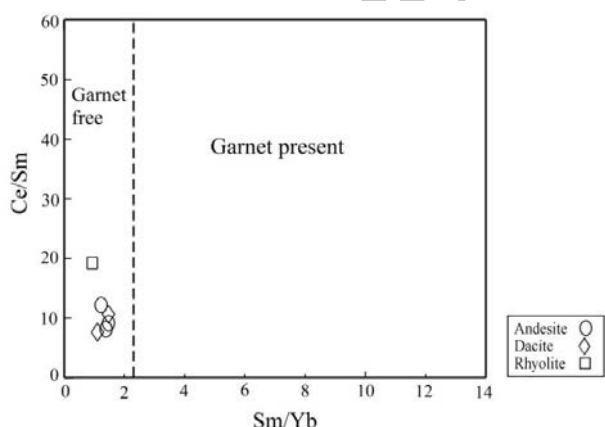


شکل ۱۸- سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان) در نمودار Nb/Y در برابر Rb/Y (Pearce, 1983) دارای روند پهنه‌های فرورانش غنی‌شده یا آرایش پوسته‌ای هستند.

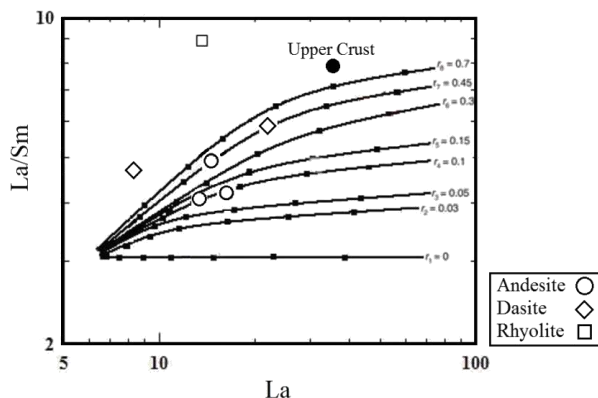
به باور Koglin و همکاران (۲۰۰۹)، نسبت‌های Ce/Y و Zr/Y در هنگام تبلور تفریقی تا اندازه‌ای ثابت می‌ماند؛ اما تغییرات بسیار آنها نشان‌دهنده درجاتی از آرایش پوسته‌ای است. مقادیر Ce/Y در این سنگ‌ها ۱/۱۱ تا ۲/۸ و Zr/Y نیز ۵/۲ تا ۹/۴ است که می‌تواند نشان‌دهنده آرایش پوسته‌ای باشد. نمودار Rb در برابر CaO (Yanagi and Yamashita, 1994) نیز برای بررسی نقش آرایش و آمیزش ماگمایی به کار می‌رود. در

1994). از این‌رو، در نمودار Sm/Yb در برابر Ce/Sm (Coban, 2007)، نسبت Sm/Yb=2.5 دو گستره دارای گارنت و بی‌گارنت را از یکدیگر جدا می‌کند. در این نمودار، سنگ‌های منطقه نابر در گستره بی‌گارنت‌ها جای گرفته‌اند (شکل ۲۱).

عناصر La و Sm با تغییرات کانی‌شناسی سنگ خاستگاه دچار تغییر نمی‌شوند؛ از این‌رو، می‌توانند ترکیب کلی سنگ را نشان دهند (Aldanmaz et al., 2000). با بررسی نمونه‌ها در نمودار La/Sm در برابر Sm/Yb (Aldanmaz et al., 2000)، به نظر می‌رسد این سنگ‌های دارای خاستگاه اسپینل‌لرزلولیت هستند (شکل ۲۲). چنین خاستگاه اسپینل‌لرزلولیتی نشان می‌دهد که پیدایش و جدایش این ماگماها از گوشته باید در ژرفای کمتر از ۷۰ کیلومتر روی داده باشد؛ زیرا کانی اسپینل در این فشارها پایدار است. بر پایه الگوی پیشنهادی Fleche و همکاران (۱۹۹۸)، که بر پایه ذوب‌بخشی در دو گوشته تهی‌شده و غنی‌شده به‌دست آمده، ماگمای مادر سنگ‌های منطقه نابر، از گوشته غنی‌شده و در ژرفای ۵۵ تا ۶۲ کیلومتر پدید آمده است (شکل ۲۳).



شکل ۲۱- سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان) در نمودار Sm/Yb در برابر Ce/Sm (Coban, 2007) و نبود گارنت در سنگ خاستگاه برای این سنگ‌ها.

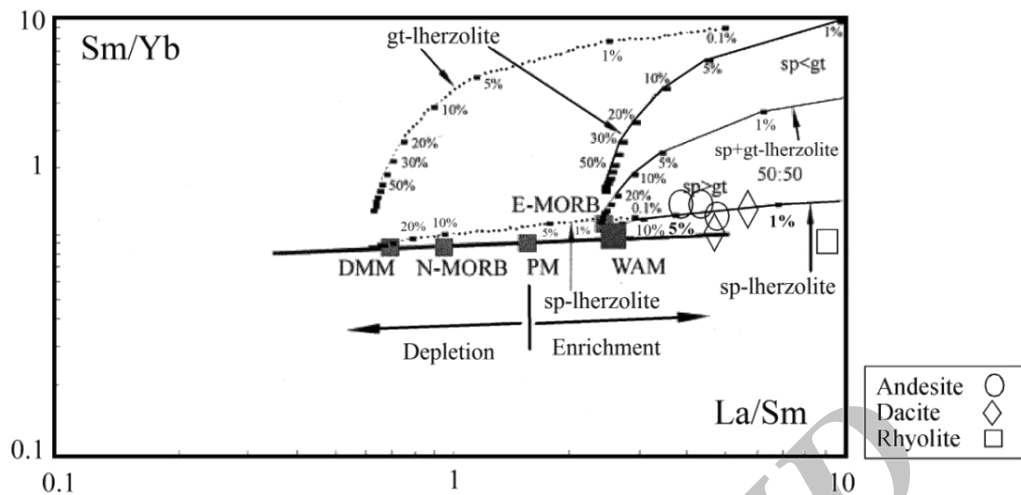


شکل ۲۰- سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر (جنوب‌باختری کاشان) در نمودار La/Sm در برابر La بر پایه فرمول DePaolo (۱۹۸۱)، برای الگوسازی فرایند آرایش پوسته‌ای-جدایش بلورین (AFC)

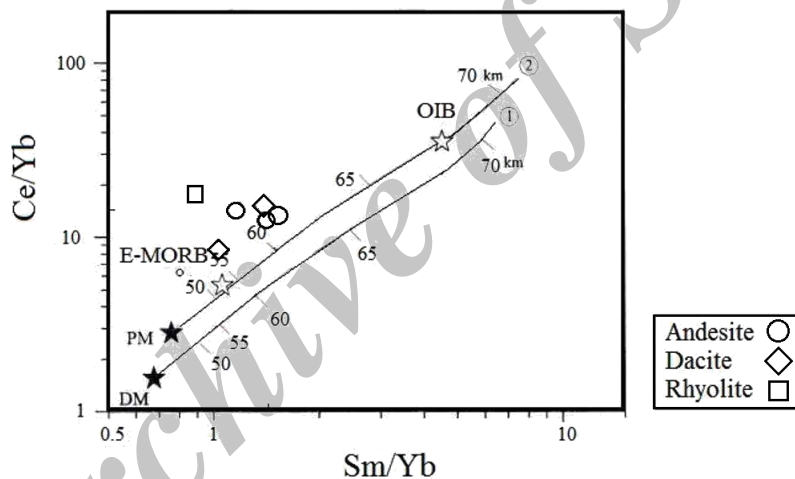
بررسی خاستگاه

همان‌گونه که در شکل ۱۶-A دیده می‌شود، سنگ‌های منطقه نابر در جایگاه ماگماهای وابسته به پهنه‌های فرورانش جای گرفته‌اند. از این‌رو، به نظر می‌رسد که این سنگ‌ها، از ذوب‌بخشی خاستگاه گوشته‌ای پدید آمده باشند که با سیال‌ها و یا مذاب‌های برخاسته از صفحه اقیانوسی فرورونده، غنی شده‌اند. این سازوکار، شاید در هنگام فرورانش و بسته‌شدن اقیانوس نئوتتیس روی داده است (Stalder, 1971). ماگماهای وابسته به گوشته لیتوسفری آشکارا دارای نسبت La/Nb بیشتر از ۱ هستند؛ اما این نسبت در ماگماهای جداشده از گوشته استنوسفری نزدیک به ۰/۷ است (DePaolo and Daley, 2000). این نسبت در سنگ‌های منطقه نابر ۲ تا ۴/۳۶ بوده و نشان‌دهنده خاستگاه لیتوسفری این ماگماهاست.

بود یا نبود گارنت در سنگ خاستگاه به‌جای‌مانده، شاید تأثیر مهمی در پیدایش روندهای جدایشی REE‌ها داشته باشد (Coban, 2007). با درگیرشدن گارنت در مذاب‌های برآمده از ذوب‌بخشی گوشته، نسبت Sm/Yb افزایش می‌یابد؛ اما نسبت Ce/Sm در هنگام جدایش بلورین به‌گونه نسبی افزوده می‌شود (Hawkesworth et al.,



شکل ۲۲- سنگ خاستگاه سنگ‌های آتشفشانی خاور ناب (جنوب‌باختری کاشان) در نمودار La/Sm در برابر Sm/Yb (Aldanmaz *et al.*, 2000) یک اسپینل لرزولیت است.



شکل ۲۳- سنگ‌های آتشفشانی خاور ناب (جنوب‌باختری کاشان) در نمودار Ce/Yb در برابر Sm/Yb (Fleche *et al.*, 1998) گستره ژرفای ۵۵ تا ۶۲ کیلومتر جای می‌گیرند. مرز بین محدوده گارنت‌دار و اسپینل‌دار در ژرفای ۶۵ کیلومتر است (PM: گوشته نخستین، DM: گوشته تهی‌شده).

هستند. اپیدوت، کلسیت، اسفن، کلریت، آپاتیت، کانی کدر، سربیسیت، سوسوریت و مجموعه ترمولیت - اکتینولیت از کانی‌های فرعی و ثانوی این سنگ‌ها به‌شمار می‌روند.

برخی شواهد بافتی در این سنگ‌های می‌توانند نشان‌دهنده پیدایش آنها در هنگام بالا آمدن پرشتاب ماگما و یا فرایند آمیزش ماگمایی باشند. این شواهد عبارت هستند از: (۱) بافت غربالی، کناره‌های غبارآلود و

نتیجه‌گیری

بر پایه بازدیدهای صحرایی و بررسی‌های سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی خاور ناب، این سنگ‌ها گستره‌ای از سنگ‌های حد واسط تا اسیدی را در بر گرفته‌اند و شامل پیروکسن‌اندزیت، آندزیت، داسیت و ریولیت هستند. پلاژیوکلاز، کلینوپروکسن، آمفیبول، بیوتیت، کوارتز و پتاسیم‌فلدسپار از کانی‌های اصلی و فراوان این سنگ‌ها

سنگ‌ها در کمان‌های آتشفشانی قاره‌ای و پهنه‌های فرورانش هستند. به نظر می‌رسد که اندازه‌های منطقه خاور نابر از ذوب‌بخشی گوشته غنی شده با نزدیک به ۱ تا ۵ درصد ذوب‌بخشی یک خاستگاه اسپینل‌لرزولیت پدید آمده باشند. غنی شدن گوشته را می‌توان به فرورانش پوسته اقیانوسی فرورونده نسبت داد.

ویژگی‌های زمین‌شیمیایی، کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی این منطقه با یافته‌های نقاط دیگر در پهنه ماگمایی ارومیه-دختر سازگاری دارد و می‌توان آن را یک پهنه ماگمایی وابسته به فرورانش دانست. مهم‌ترین این ویژگی‌ها عبارتند از: (۱) گرایش ترکیب شیمیایی سنگ‌های منطقه به سری کالک‌آلکان؛ (۲) فراوانی و روند تغییرات عناصر کمیاب، به‌ویژه آنومالی منفی Nb و Ta؛ (۳) بافت پورفیری همراه با فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، آمفیبول، کلینوپیروکسن و بیوتیت؛ (۴) فراوانی سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیت و داسیت.

سپاس‌گزاری

نگارندگان از پشتیبانی تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان و همچنین، آقای پروفیسور ماسونه از دانشگاه اشتوتگارت آلمان، برای همکاری در تجزیه ریزکاوالکترونی و سنگ‌کل، سپاس‌گزاری می‌کنند.

منطقه‌بندی نوسانی در پلاژیوکلازها؛ (۲) لبه‌های گردشده و خوردگی خلیجی در کانی‌ها.

ترکیب شیمیایی سنگ‌ها و نیز شیمی کانی‌ها، سری ماگمایی سنگ‌های آتشفشانی خاور نابر را ساب‌آلکان و از گروه کالک‌آلکان با پتاسیم متوسط نشان می‌دهند. از دید میزان اشباع‌شدگی از آلومین، این نمونه‌ها سرشت مت‌آلومینوس دارند. در نمودارهای هارکر، با افزایش SiO_2 ، میزان Al_2O_3 ، Fe_2O_3 ، CaO ، MgO ، TiO_2 و P_2O_5 روند کاهشی دارد و میزان K_2O روند افزایشی نشان می‌دهد. این روندها می‌توانند نشان‌دهنده جدایش بلورین در هنگام تبلور باشند. در نمودارهای بهنجار شده و عنکبوتی، تهی‌شدگی آشکار عناصر HREE در برابر LREE و HFSE در برابر LILE از ویژگی‌های ماگمایی وابسته به پهنه‌های فرورانش و سری ماگمایی کالک‌آلکان است. غنی شدن سنگ‌ها از LREE و LILE و فقیر شدن آنها از HREE و HFSE را می‌توان به فرایند فرورانش و آرایش وابسته دانست. شواهد احتمالی دیگر برای آرایش پوسته‌ای در این سنگ‌ها، نسبت‌های La/Nb (۲-۴/۳۶)، Nb/La (۰/۲۳-۰/۵) و Sr/Ce (۱۹-۸/۴) هستند. در این سنگ‌ها، Ce/Y از ۱/۱۱ تا ۲/۸ و مقادیر Zr/Y نیز از ۵/۲ تا ۹/۴ متغیر هستند که می‌توانند نشان‌دهنده آرایش پوسته‌ای باشند. نمودارهای شناسایی پهنه زمین‌ساختی نیز نشان‌دهنده پیدایش

منابع

- Abbasi, S. (2012) Petrography and petrology of intermediate rocks in the east of Nabar area (SW of Kashan). M.Sc. thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran (in Persian).
- Ahmadi, A. R., Ghorbani, M. R. and Tipolo, M. (2011) The role of crustal contamination and fractional crystallization processes (AFC) in transition of tertiary alkaline magmatism of Taleghan. *Geology of Iran* 4(16): 75-96 (in Persian).
- Aldanmaz, E., Pearce, J. A., Thirlwall, M. F. and Mitchell, G. J. (2000) Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 102: 67-95.
- Almeida, M. E., Macambira, M. J. B. and Oliveira, E. C. (2007) Geochemistry and zircon geochronology of the I-type high-K calc-alkaline and S-type granitoid rocks from southeastern

- Roraima, Brazil: Orosirian collisional magmatism evidence (1.97–1.96 Ga) in central portion of Guyana Shield. *Precambrian Research* 155: 69-97.
- Anderson, A. T. (1984) Probable relations between plagioclase zoning and magma dynamics: Fuego Volcano, Guatemala. *American Mineralogist* 69: 660-676.
- Aoki, K. and Shiba, I. (1973) Pyroxenes from lherzolite inclusions of Itinome-Gata, Japan. *Lithos* 6: 41-51.
- Coban, H. (2007) Basalt magma genesis and fractionation in collision and extension-related provinces: A comparison between eastern, central and western Anatolia. *Earth Science Reviews* 80: 219-238.
- Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J. (1992) An introduction to the rock forming minerals. Longman, London.
- DePaolo, D. J. (1981) Trace elements and isotopic effects of combined wall rock assimilation and fractional crystallization. *Earth and Planetary Science Letters* 35: 189-202.
- DePaolo, D. J. and Daley, E. E. (2000) Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental extension. *Chemical Geology* 169: 157-185.
- Fleche, M. R., Camire, G. and Jenner, G. A. (1998) Geochemistry of post-Acadian, Carboniferous continental intraplate basalts from the Maritimes Basin, Magdalen Islands, Quebec, Canada. *Chemical Geology* 148: 115-136.
- Fleet, M. E. and Barnett, R. L. (1978) Partitioning in calciferous amphiboles from the Froid mine, Sudbury, Ontario. *The Canadian Mineralogist* 16: 527-532.
- Gill, R. (2010) *Igneous rocks and processes: A Practical Guide*. Wiley-Blackwell, Chichester, UK.
- Ginibre, C., Kronz, A. and Worner, G. (2002) High-resolution quantitative imaging of plagioclase composition using accumulated back-scattered electron image: new constraints on oscillatory zoning. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 142: 436-448.
- Gioncada, A., Hauser, N., Matteini, M., Mazzuolir, M. and Omarini, R. (2006) Mingling and mixing features in basaltic andesites of the eastern Cordillera (central Andes, 24°S): a petrographic and microanalytical study. *Peridico di Mineralogia* 75(2-3): 127-140.
- Green, N. L. (2006) Influence of slab thermal structure on basalt source regions and melting conditions: REE and HFSE constraints from Garibaldi volcanic belt, northern Cascadia subduction system. *Lithos* 87: 23-49.
- Halsor, S. P. (1989) Large glass inclusions in plagioclase phenocrysts and their bearing on the origin of mixed andesitic lavas at Toliman Volcano, Guatemala. *Bulletin of Volcanology* 51: 271-280.
- Harker, A. (1909) *The natural history of igneous rocks*. Methuen and Co. London.
- Hawkesworth, C. J., Gallagher, K., Hergt, J. M. and McDermott, F. (1994) Destructive plate margin magmatism: Geochemistry and melt generation. *Lithos* 33: 169-188.
- Irvine, J. N. and Baragar, W. K. (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8: 523-548.
- Javadi, F. (2012) *Petrology and geochemistry of east of Nabar skarn at the south west of Kashan*. M.Sc. thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran (in Persian).
- Jung, S., Mezger, K. and Hoernes, S. (2004) Shear zone – related syenites in the Damara belt (Namibia): The role of crustal contamination and source composition. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 148: 104- 121.

- Kamali, A., Moayyed, M., Jahangiri, A., Amel., N., Pirooj, H. and Ameri, A. (2011) The petrography and geochemistry of volcanic rocks of Ghaflankuh, Myaneh (NW Iran). *Petrology* 2(6): 97-115 (in Persian).
- Keskin, M., Pearce, J. A. and Mitchell, J. G. (1998) Volcanostratigraphy and geochemistry of collision related volcanism on the Erzurum-Kars Plateau, northeastern Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 85: 355-404.
- Koglin, N., Kostopoulos, D. and Reischmann, T. (2009) Geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of the Samothraki mafic suite, NE Greece: Trace-element, isotopic and zircon age constraints. *Tectonophysics* 473: 53-68.
- Krauskopf, K. P. and Bird, D. K. (1976) Introduction to geochemistry. 3rd Edition, New York, McGraw-Hill.
- Leake, B. E., Wolley, R., Arps, C. E. S., Birch, W. D., Gilbert, M. C., Grice, J. D., Hawthorn, F. C., Kato, A., Kisch, H. J., Krivovichev, V. G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J., Maresch, W. V., Nickel, E. H., Rock, N. M. S., Schumacher, J. C., Smith, D. C., Stephenson, N. C. N., Ungaretti, L., Whittaker, E. J. W. and Youzhi, G. (1997) Nomenclature of Amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association commission on new minerals and mineral names. *The Canadian Mineralogist* 35: 219-246.
- LeMaitre, R. W., Bateman, P., Dudek, A., Kellre, J., Le Bas, M. J., Sabine, P. A., Schmid, R., Sorenson, H., Streckeisen, A., Woolley, A. and Zanettin, B. (1989) A classification of igneous rocks and glossary of terms. Blackwell, Oxford, UK.
- Machado, A., Lima, E. F., Chemale, J. F., Morta, D., Oteiza, O., Almeida, D. P. M., Figueiredo, A. M. G., Alexander, F. M. and Urrutia, J. L. (2005) Geochemistry constraints of Mesozoic-Cenozoic calc-alkaline magmatism in the South Shetland arc, Antarctica. *Journal of Earth Science* 18: 407-425.
- Maniar, P. D. and Piccoli, P. M. (1989) Tectonic discrimination of granitoids. *Geological society of America Bulletin* 101: 635-643.
- Moinvaziri, H. (1996) A Preface of magmatism in Iran. Tarbiat Moallem University Publication, Tehran (in Persian).
- Morimoto, N., Fabrice, J., Ferguson, A., Ginzburg, I. V., Ross, M., Seifert, F. A., Zussman, J., Aoki, K. and Gottardi, G. (1988) Nomenclature of pyroxene. *Mineralogical Magazine* 52: 535-555.
- Nelson, T. S. and Montana, A. (1992) Sive-textured plagioclase in volcanic rocks produced by rapid decompression. *American Mineralogist* 77: 1242-1249.
- Orozco Esquivel, T., Pwtrone, C. M., Faerrari, L., Tagami, T. and Manetti, P. (2007) Geochemical variability in lavas from the eastern Trans – Mexican volcanic belt: slab detachment in a subduction zone with varying dip. *Lithos* 93: 149-174.
- Pearce, J. A. (1983) Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins, In: *Continental Basalts and Mantle Xenoliths* (Eds. Hawkesworth, C. J. and Norry, M. J.) 230–249. Shiva Publishing Limited, Nantwich.
- Pearce, J. A. and Norry, M. J. (1979) Petrogenetic implication of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 69: 33-47.
- Peng, T., Wang, Y., Zhao, G., Fan, W. and Peng, B. (2007) Arc-like volcanic rocks from the southern Lancangtion Zone, SW of China: geochronological and geochemical constraint on their petrogenesis and tectonic implication. *Lithos* 102: 358-373.

- Perugini, D. and Poli, G. (2012) The mixing of magmas in plutonic and volcanic environments: Analogies and differences. *Lithos* 132: 1-17.
- Perugini, D., Poli, G. and Valentini, L. (2005) Strange attractors in plagioclase oscillatory zoning: petrological implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 149: 482-497.
- Radfar, J. and Alai Mahabadi, S. (1993) Geological Map of Kashan 1:100000. Geological Survey of Iran Publication. Tehran.
- Reichew, M. K., Saunders, A. D., White, R. V. and Al M-Ukhamedov, A. I. (2004) Geochemistry and Petrogenesis of Basalts from the West Siberian Basin: an extension of the Permo-Triassic Siberian Traps, Russia. *Lithos* 79: 425-452.
- Rollinson, H. R. (1993) Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation. John Wiley and Sons, New York, US.
- Schandl, E. S. and Gorton, M. P. (2002) Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. *Economic Geology* 97: 629-642.
- Shelley, D. (1993) *Igneous and metamorphic rocks under the microscope*. Chapman and Hall, London.
- Sommer, C. A., Lima, E. F., Nardi, L. V. S., Liz, J. D. and Waichel, B. L. (2006) The evolution of Neoproterozoic magmatism in Southernmost Brazil: shoshonitic, high- K tholeiitic and silica-saturated, sodic alkaline volcanism in post collisional basins. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias* 78: 573-589.
- Stalder, P. (1971) Magmatismes tertiaires. Et subrecent entre Taleghan et Alamout, Elbourz central (Iran). *Bulletin Suisse de Mineralogie et Petrographie* 51(1): 139.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in ocean basins* (Eds. Saunders, A. D. and Norry, M. J.) Special Publications 42: 313-345. Geological Society of London.
- Tatsumi, Y., Hamilton, D. L. and Nesbitt, R. W. (1986) Chemical characteristics of fluid phase released from a subducted lithosphere and origin of arc magmas: evidence from high pressure experimental natural rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 29: 239-309.
- Wallace, G. and Bergantz, G. (2002) Wavelet-based correlation (WBC) of crystal populations and magma mixing. *Earth and Planetary Science Letters* 202: 133-145.
- Winchester, J. D. and Floyd, P. A. (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* 20: 325-342.
- Yanagi, T. and Yamashita, K. (1994) Genesis of continental crust under island arc conditions. *Lithos* 33: 209-223.
- Zarrinkoub, M. H., Mohammadi, S. and Yousefi, F. (2011) Geochemistry and petrogenesis of Givshad volcanic and subvolcanic rocks (southwest of Birjand, east of Iran). *Petrology* 2(7): 39-50 (in Persian).

Petrography and geochemistry of volcanic rocks in the east of Nabar (SW of Kashan) with emphasis on the role of crustal contamination

Leila Ebrahimi and Seyed Mohsen Tabatabaei Manesh *

Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract

The studied area is located in the east of Nabar village and southwest of Kashan, a part of the Urumieh – Dokhtar magmatic arc. The volcanic rocks belonging to Eocene age, are composed of pyroxene andesites, andesites, dacites and rhyolites. Porphyritic, glomeroporphyritic, microlitic, and sieved textures are the most common textures of these rocks. Plagioclase, clinopyroxene and amphibole are the predominant minerals in the pyroxene andesites and andesites, whereas dacites and rhyolites are characterized by the presence of plagioclase, amphibole, quartz, biotite, and K-feldspar. Inequilibrium textures including embayed plagioclases and quartz with rounded margins, and oscillatory zoning in the plagioclases, sieved texture, and dusty rims are evidences of magma mixing. The enrichment in LREE and LILE and the HREE and HFSE depletion in the chondrite and primitive mantle normalized diagrams point to calc-alkaline nature of the rocks studied and they are related to volcanic arcs setting. High ratio of La/Nb (2-4.36) and negative Ti and Nb anomalies in spider diagrams can support crustal contamination hypotheses of these rocks. Also, low ratio of Nb/La (0.23-0.5) and high ratio of Sr/Ce (8.4-19) indicate contamination of parental magma with crustal materials. The rocks studied are formed from magma which is derived from enriched-mantle with 1-5 percent partial melting of spinel-lehrzolute.

Key words: Geochemistry, Urumieh-Dokhtar, Volcanic rocks, Kashan, Nabar

* tabataba@sci.ui.ac.ir